

# **Qualifizierung additiv hergestellter Bauteilstrukturen in geregelten Bereichen**

*B. Kranz, B. Grunewald, A. Ehrich, S. Keitel*

*Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH*

*qs@slv-halle.de*

*F. Häschel*

*Häschel Metalltechnik GmbH & Co. KG*

*falk@hmt-haeschel.de*

---

## **Abstract**

Die additive Fertigung von metallischen Bauteilen wird weitestgehend unter Anwendung von Schweißprozessen realisiert. Wenn geschweißt wird, lassen sich jedoch am fertigen Produkt die gestellten Anforderungen nicht vollumfänglich überprüfen. Normen und Regelwerke der Qualitätssicherung und des -managements sprechen hier von einem speziellen Prozess, der bereits vor Beginn der Fertigung qualitätssichernde Maßnahmen verlangt. Ziel dieser Vorarbeiten ist es, nach Fertigstellung des Produktes zumindest die Vermutung äußern zu können, dass darin die erforderlichen Qualitätsmerkmale erfüllt sind.

In geregelten Bereichen bzw. Branchen wird die Anwendung von Normen und Regelwerken durch Gesetze, Verordnungen bzw. Richtlinien vorgeschrieben. Beim Schweißen ist dies meist mit Vorgaben verbunden, wie Schweißprozesse zu qualifizieren sind. Bisher stand jedoch das Verbindungsschweißen im Vordergrund.

Aufgrund der abweichenden Bedingungen gegenüber dem Verbindungsschweißen wird empfohlen, den additiven Fertigungsprozess über eine vorgezogene Arbeitsprüfung nach DIN EN ISO 15613 oder über eine Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614 mit erweitertem Prüfumfang zu qualifizieren.

---

# **1 Einführung**

Die additive Fertigung von metallischen Bauteilen wird weitestgehend unter Anwendung von Schweißprozessen realisiert. Bindungsmechanismen, Wärmeführung und Gefügeentstehung sind im Grundsatz weitestgehend bekannt. Charakteristisch für stoffschlüssige Verbindungen ist es deshalb auch, dass sich am fertigen Produkt die gestellten Anforderungen nicht vollumfänglich überprüfen lassen. Die Normen der Qualitätssicherung und des -managements sprechen hier von einem speziellen Prozess (DIN EN ISO 9000 [1]), der bereits vor Beginn der Fertigung qualitätssichernde Maßnahmen verlangt. Entsprechendes Ziel dieser Maßnahmen ist es, nach Fertigstellung des Produktes zumindest die Vermutung äußern zu können, dass in ihm die erforderlichen Qualitätsmerkmale erfüllt sind. Diese Vermutung ist berechtigt, wenn an einem Vergleichsbauteil die Qualitätsanforderungen erfüllt und die ermittelten Prozessparameter eingehalten werden.

Die Anforderungen zur Erfüllung dieses grundlegenden Zieles mit Bezug zu einer schweißtechnischen Fertigung werden in der Basisnorm DIN EN ISO 3834 [2] beschrieben. Diese Norm verlangt unter anderem, dass zu Beginn Prüfungen und Überlegungen darüber anzustellen sind, welche gesetzlichen Vorgaben einzuhalten sind, welche Qualitätskriterien an das Produkt gestellt werden und ob diese durch eigene Möglichkeiten, Fähigkeiten und eventuell erforderliche Zertifizierungen erfüllt werden können. Es sind dabei Betrachtungen hinsichtlich der Schweißsicherheit, der Schweißmöglichkeit und der Schweißeignung anzustellen. Hinter diesen Begriffen verbirgt sich die Frage, ob eine Schweißaufgabe hinsichtlich des Werkstoffverhaltens beim Schweißen mit den zur Verfügung stehenden Schweißprozessen an der vorgegebenen Konstruktion ausführbar ist.

Die Normenreihe DIN EN ISO 3834 [2] beschreibt Anforderungen nur grundsätzlich. Jedoch allein ihre bloße Existenz hat juristisch gesehen fundamentalen Charakter. Durch sie erübrigt sich weitestgehend die Unterscheidung in gesetzlich geregelte, geregelte oder auch ungeregelte Bereiche. Umgangssprachlich wird von ungeregelten Bereichen gesprochen, wenn keine gesetzlichen Bestimmungen vorliegen oder der Kunde keine spezifischen Anforderungen gestellt hat.

Jeder hat das Recht auf körperliche Unversehrtheit. Es ist deshalb ein Irrtum zu glauben, dass eine Fertigung ohne Qualitätsvorgaben erfolgen kann. Durch das bloße Vorhandensein der Normenreihe DIN EN ISO 3834 [2] ist der Hersteller im Sinne der Produkthaftung gefordert, sich auf Basis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik eigene Qualitätskriterien vorzugeben und im Produkt umzusetzen. Bei Unterlassung hätte er im Schadensfall keine Möglichkeit, Ersatzansprüche abzuwehren.

Für Hersteller von Schweißkonstruktionen, die gesetzlich vorgeschriebenen Regelungen unterliegen oder Spezifikationen der Auftraggeber umzusetzen haben, ist der Umgang mit dieser Problematik etwas einfacher. Grund dafür ist, dass die Fachnormen einzelner Branchen auf der DIN EN ISO 3834 [2] aufbauen und die darin formulierten allgemeinen Forderungen mit zum Teil sehr konkreten Fachnormen oder Anwendungsnormen untersetzen. Meist ist dies mit Vorgaben verbunden, wie Schweißprozesse zu qualifizieren sind.

Bisher stand jedoch das Verbindungsschweißen im Vordergrund. Additive Fertigungsverfahren wurden hingegen kaum betrachtet. Nachfolgend werden Vorschläge unterbreitet, wie die additive Fertigung einbezogen werden kann. Dabei kann man auch Analogien zum Auftragschweißen einbeziehen. Anhand eines Beispiels, bei dem eine Hohlprofilknotenstruktur aus dem Stahlbau substituiert werden soll, werden die Vorschläge erläutert. In dem Entwicklungsprojekt begleitete zunächst der Bereich "Forschung und Entwicklung" der SLV Halle den Hersteller Häschel Metalltechnik aus Heidenau bei der Entwicklung der Technologie und anschließend der Bereich „Qualitätssicherung“ als Prüfstelle.

## **2 Möglichkeiten zur Qualifizierung von Schweißprozessen**

Bevor auf Möglichkeiten zur Qualifizierung additiv gefertigter Bauteile eingegangen werden kann, ist es erforderlich, die Forderungen und Wege für das Verbindungsschweißen aufzuzeigen. Das Schweißen hat allgemein gemäß ISO 3834-1 [2] unter Einhaltung einer Schweißanweisung (WPS - welding procedure specification) zu erfolgen. Es wird weiterhin gefordert, dass diese WPS auf einer Qualifizierung des Schweißverfahrens basieren muss. Die Qualifizierung ist in einem Prüfbericht (WPQR - welding procedure qualification record) zu dokumentieren. In der WPS ist dann auf den entsprechenden WPQR Bezug zu nehmen.

Die Art der Qualifizierung von Schweißprozessen hängt vom Werkstoff, dem Schweißprozess, der Konstruktion sowie von den Anforderungen ab, die später das Endprodukt erfüllen muss. So wird beispielsweise im Stahlbau gefordert, dass die Festigkeit und Zähigkeit im Grundwerkstoff, in der Wärmeeinflusszone sowie im Schweißgut erhalten bleibt. Von Schweißverbindungen ausgehende Verformungs- und Sprödbrüche sollen so ausgeschlossen werden. Für vorwiegend ruhend beanspruchte Konstruktionen ist dies im Allgemeinen ausreichend. Anders verhält es sich, wenn Konstruktionen zyklischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Hier wird aus Kostengründen auf Untersuchungen innerhalb einer Verfahrensprüfung verzichtet, wenn die Bemessung und Konstruktion nach mitgeltenden Bemessungsnormen erfolgt. Beispielsweise wären für den Stahlbau

die DIN EN 1993-1-9 [3] und für den Schienenfahrzeugbau die Richtlinie DVS 1612 [4] heranzuziehen. Die dort festgeschriebenen Festigkeitskennwerte beinhalten die durch das Schweißen bedingten Imperfektionen hinsichtlich des Werkstoffs, des Schweißprozesses sowie entsprechender Bauformen. Wird hingegen davon abgewichen, wird die Erweiterung der Verfahrensprüfung mit Versuchen zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit gefordert.

Festigkeit und Zähigkeit sind nur zwei Kriterien, denen Schweißverbindungen genügen müssen. Es gibt eine Vielzahl weiterer wie zum Beispiel Korrosionsbeständigkeit, Warmfestigkeit, Kaltzähigkeit, Begrenzung von Eigenspannungen oder auch Leckdichtheit. Die Genannten und weitere können in Verfahrensprüfungen einbezogen werden. Mit dem vorhandenen Regelwerk zur Qualifizierung von Schweißprozessen [5–12] wird der Versuch unternommen, die wichtigsten Kriterien zu behandeln. Es wird jedoch Fälle geben, in denen über die grundsätzlichen Vorgaben hinausgegangen werden muss. Das Regelwerk lässt dies zu.

Die einfachste Art einen Schweißprozess zu qualifizieren, ist der Einsatz geprüfter Schweißzusätze gemäß Norm DIN EN ISO 15610 [8]. Diese Norm ist auf die Anwendung von Grundwerkstoffen beschränkt, bei denen die erzeugten Mikrostrukturen zulässig sind und bei denen die Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone den betrieblichen Einsatz nicht entscheidend verschlechtern. Dies ist beispielsweise für Baustähle mit geringeren Festigkeiten gegeben. In der WPS sind Schweißparameter aufzuführen, die der Hersteller des Zusatzwerkstoffes in seinen Verarbeitungsrichtlinien angibt.

Jedoch ist der Einsatz geprüfter Schweißzusätze nicht immer ausreichend. Durch unzureichend betrachteten Energieeintrag und unkontrollierte Abkühlbedingungen kann es zu Verlust an Zähigkeit und/oder Plastifizierungsvermögen kommen. Deshalb werden in der Normenreihe DIN EN ISO 15614 [12] für unterschiedliche Schweißprozesse und Werkstoffe Mindestvorgaben zur Prozessqualifizierung gemacht. Dabei anzumerken ist, dass die Forderungen zur Werkstoffprüfung im Grad der Konkretisierung stark schwanken können. Bei Schweißprozessen und Werkstoffen, bei denen der Wissensstand sehr hoch ist, werden detaillierte Anforderungen gestellt. Für das Lichtbogenschweißen an Stählen für Schweißverbindungen am Stumpfstoß und für Kehlnähte, das im Teil 1 behandelt wird, trifft dies zum Beispiel zu. Im Teil 11 erfolgen ähnliche Vorgaben für das Strahlschweißen. Diese sind allerdings wesentlich ungenauer formuliert, da beispielsweise die Zähigkeit in der Wärmeeinflusszone im Gegensatz zu lichtbogengeschweißten Verbindungen kaum mit den herkömmlichen Methoden geprüft werden kann.

Das Auftragschweißen wird im Teil 7 der DIN EN ISO 15614 [12] behandelt. Dabei stehen das Plattieren und die Hartauftragung im Mittelpunkt der Betrachtung. Für

Hartauftragungen sind die zu erbringenden Härtewerte vorher festzulegen. Dem gegenüber Verbindungsschweißungen angepassten Aufbau der einzelnen Schweißlagen wird Rechnung getragen.

Diese Ausführungen und jene zum Teil 11 sollen verdeutlichen, dass es sich bei der Normenreihe DIN EN ISO 15614 [12] um die mit den umfangreichsten Vorgaben handelt, sie aber nicht alle eventuell erforderlichen Gesichtspunkte berücksichtigt und wie im Abschnitt 2 angemerkt, nicht berücksichtigen kann. Die Normenreihe lässt aber genügend Spielraum, um auf neue Anforderungen reagieren zu können.

Eine weitere Möglichkeit einen qualifizierten Schweißprozess einzusetzen, besteht in der Anwendung eines Standardschweißverfahrens. Hierzu werden Regelungen in der Norm DIN EN ISO 15612 [10] getroffen. Dabei wird auf Schweißparameter zurückgegriffen, die nicht bei eigenen Verfahrensqualifikationen bestätigt wurden, sondern durch an der Fertigung Unbeteiligte zur Verfügung gestellt werden. Stromquellen für das Metallschutzgasschweißen werden beispielsweise auf Kundenwunsch mit Schweißanweisungen ausgeliefert, die bereits den Qualifizierungsprozess vorzugsweise nach DIN EN ISO 15614 [12] durchlaufen haben.

Die Qualifizierung auf Basis vorliegender schweißtechnischer Erfahrung gemäß Norm DIN EN ISO 15611 [9] verlangt eine vorlaufende, fertigungsbegleitende Prüfung der Produkte. Je nach Anforderungen sind zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen auszuführen. Diese Prüfungen sind zu dokumentieren. Der bloße Verweis auf bisherige Schadensfreiheit ist nicht ausreichend.

Die bisher genannten Normen zielen hauptsächlich auf Schweißverbindungen am Stumpf- und T-Stoß sowie auf Kehlnähte ab. Für diese Standardformen lassen sich Geltungsbereiche relativ unproblematisch formulieren. Wird jedoch in der Stoßgeometrie und Nahtform davon abgewichen, nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass im fertigen Produkt nicht mehr alle Qualitätsparameter eingehalten werden können. Für diesen Fall ist die Qualifizierung auf Basis einer Arbeitsprüfung nach DIN EN ISO 15613 [11] vorzuziehen. Zwar sollen dabei so viele Prüfungen wie möglich gemäß DIN EN ISO 15614 [12] durchgeführt werden, praktisch wird der Prüfumfang jedoch freigegeben. Dafür ist der Geltungsbereich weitestgehend auf die betreffende Schweißverbindung beschränkt.

### **3 Übertragung auf additiv gefertigte Strukturen**

Für additiv gefertigte Strukturen ergibt sich dadurch eine Vereinfachung, indem die Untersuchung des thermisch beeinflussten Grundwerkstoffs nur dann erforderlich ist, wenn

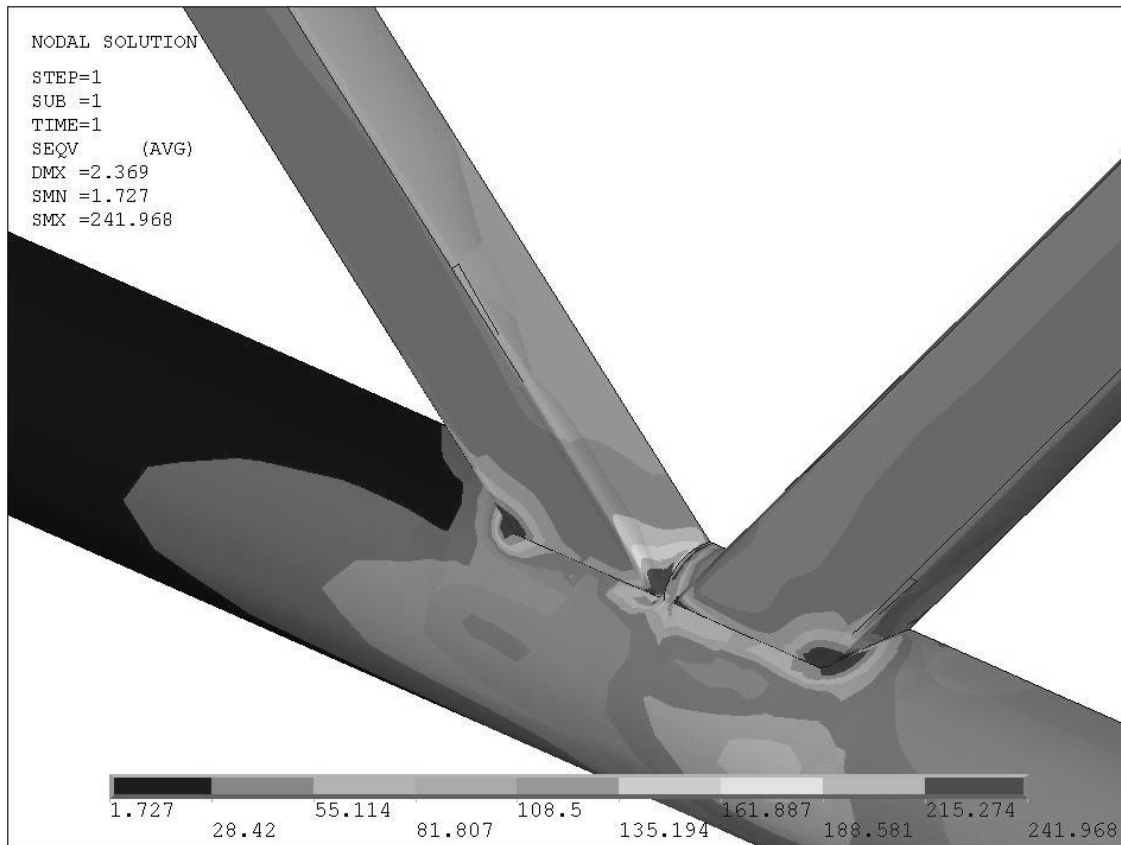
es sich um eine Anschlussstruktur handelt. Dies spricht zunächst für eine Qualifizierung des Schweißprozesses auf Basis einer Arbeitsprüfung nach DIN EN ISO 15613 [11].

Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist jedoch, dass für ein zu fertigendes Bauteil im Vorfeld eine Probe zu untersuchen wäre, die weitestgehend dem geplanten Bauteil entspricht. Dieses Vorgehen ist mit der höchsten Sicherheit verbunden, aus Kostengründen jedoch nicht immer sinnvoll. Deshalb sollte geprüft werden, ob Untersuchungen nach einem der Teile der Normenreihe DIN EN ISO 15614 [12] durchgeführt werden können. In dieser Normenreihe sind Geltungsbereiche festgelegt, so dass mit einer einzigen Verfahrensprüfung die Anwendung wesentlich flexibler gestaltet werden kann. Für Bauteile des Stahlbaus soll dies nachfolgend exemplarisch dargestellt werden.

Bei Konstruktionen, die anströmungsgünstige Formen aufweisen sollen, wird häufig auf Hohlprofile zurückgegriffen. In den Anschlussbereichen der Profile untereinander kommt es jedoch zur Anhäufung von dreidimensional gekrümmten Schweißverbindungen, die sich praktisch schwierig herstellen lassen [17]. Rundnähte, wie sie vergleichsweise im Rohrleitungsbau ausgeführt werden, sind wesentlich einfacher in der Herstellung. Deshalb ist die Überlegung folgerichtig, derartige Knotenstrukturen bzw. Bestandteile daraus mittels additiver Verfahren vorzufertigen.

Die Norm DIN EN 1090-2 [13] gibt den Rahmen zur Qualifizierung von Schweißprozessen vor. Die Stufe der Qualifizierung wird u. a. von der so genannten Ausführungsklasse abhängig gemacht. Hauptsächlich kommen Qualifizierungen nach [11] und [12] in Betracht.

Zur Bewertung des Ergebnisses einer Arbeitsprobe oder eines Prüfstücks in der Verfahrensprüfung ist es erforderlich, die Beanspruchungssituation und den Werkstoff, der substituiert werden soll, zu kennen. In Hohlprofilknotenkonstruktionen liegt aufgrund der konstruktiven Gestalt immer ein mehrachsiger Spannungszustand vor.



*Abb. 1: Mehrachsiger Spannungszustand in einem Hohlprofilknoten*

Dieser Zustand erfordert für den Werkstoff eine entsprechend hohe Zähigkeit, weshalb bei ferritischen Werkstoffen Kerbschlagbiegeproben in der Verfahrensqualifikation untersucht werden.

Die erforderliche Festigkeit ist von der Belastung und den Querschnittskennwerten abhängig. Zur Vereinfachung wird bei den meisten Anwendungen die Bemessung unter linear elastischen Annahmen vorgenommen. Da dies nicht den realen Gegebenheiten entspricht, müssen die Werkstoffe an Stellen hoher Spannungskonzentrationen die Fähigkeit zum Plastifizieren besitzen. In der Verfahrensqualifizierung wird deshalb auf dem Makroschliff eine Härteprüfung durchgeführt. Die Härte ist dabei nach oben begrenzt. Hohe Härtewerte bedeuten, dass zwar die Streckgrenze des Werkstoffs lokal zugenommen hat, hingegen dem Werkstoff die Fähigkeit zum Plastifizieren genommen wurde.

Der zu fertigende Bestandteil des Hohlprofilknotens weist eine Wandstärke von 25 mm bis 80 mm auf. Die mechanisch technologischen Kennwerte müssen dem Werkstoff S355J2H nach Norm DIN EN 10210-1 [14] entsprechen. Für die Probengeometrie wurde von der abgerundeten Form abgewichen, um verschiedene Untersuchungen, die

Es wurde das vollmechanisierte MAG-Schweißen eingesetzt. Als Zusatzwerkstoff wurde ein G 46 4 M21 4Si1 nach DIN EN ISO 14341 [15] mit einem Durchmesser von



Dieser Prüfkörper ermöglicht, neben Makroschliffen und Härteprüfungen auch weitere zerstörende, durch [12] geforderte Prüfverfahren anzuwenden. Gleichzeitig werden die Wärmeableitungsbedingungen eingehalten und über den in [12] formulierten Geltungsbereich ein Wandstärkenbereich von 20 bis 80 mm abgedeckt. In den zerstörenden Prüfungen wird über die Forderungen der DIN EN ISO 15614-1 [12] hinausgegangen. Aufgrund des im Bauteil dann vorliegenden mehrachsigen Spannungszustandes, wurden Zugversuche in Raupenrichtung und senkrecht dazu durchgeführt. Die Zähigkeit wurde anhand von Kerbschlagbiegeproben ermittelt. Der Kerb lag in zwei Richtungen quer zu den einzelnen Schweißraupen.

Es wurde das vollmechanisierte MAG-Schweißen eingesetzt. Als Zusatzwerkstoff wurde ein G 46 4 M21 4Si1 nach DIN EN ISO 14341 [15] mit einem Durchmesser von



1 mm verwendet. Er wurde unter Gleichstrom bei einer Lichtbogenenergie von ca. 3,8 kJ/cm und einer Zwischenlagentemperatur von 130 bis 150 °C verarbeitet.

Bei den mechanisch-technologischen Kennwerten wurden Streckgrenzen von ca. 550 bis 590 MPa und Zugfestigkeiten von ca. 620 bis 640 MPa bei Bruchdehnungen von ca. 25 % und Brucheinschnürungen um 73 % erreicht. Die geforderte Zähigkeit von 27 J bei einer Prüftemperatur von - 20 °C wurde mit 160 J ebenfalls weit übertroffen. Sowohl in der vorlaufenden zerstörungsfreien Prüfung als auch im Makroschliff konnten keine Unregelmäßigkeiten entsprechend ISO 5817 [16], Bewertungsgruppe B festgestellt werden.



*Abb. 3: Makroschliff durch den Prüfkörper*

Die Härteprüfung auf dem Schliff ergab Werte zwischen 173 und 212 HV10, die damit weit unterhalb von 380 HV10, der Vorgabe aus [12], liegen.

Die Ergebnisse der Verfahrensprüfung zeigen, dass die Forderungen, die an das Bauteil gestellt werden, eingehalten sind. Die Schweißanweisung gilt damit als bestätigt und der Schweißprozess als qualifiziert. Damit ist der Hersteller in der Lage, im Vorfeld der additiven Fertigung eine Schweißanweisung für sein zu fertigendes Bauteil abzuleiten.

#### **4 Zusammenfassung**

Eine Unterteilung in gesetzlich geregelte und unregelte Bereiche führt aufgrund der immer vorhandenen Produkthaftung stets zur Notwendigkeit einer Verfahrensqualifizierung. Sollten für das herzustellende Produkt keine gesetzlichen Vorgaben existieren

und der Kunde keine Vorgaben zur Ausführungsqualität machen, dann liegt die Verantwortung beim Hersteller. Für Bauteile, die mit Hilfe der Schweißtechnik hergestellt werden, kann die Normenreihe DIN EN ISO 3834 [2] angewendet werden. Dies gilt insbesondere für die drahtbasierten Prozesse mittels Lichtbogen (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) bzw. Laser (WLAM – Wire Laser Additive Manufacturing), die in der Normung den DED-Prozessen (Direct Energy Deposition) zugeordnet werden. Ausführlich wird in [18] über die Verfahren der additiven Fertigung berichtet.

Die dort vorgegebene Qualifizierung von Schweißprozessen hängt vom Werkstoff, dem Schweißprozess, der Konstruktion sowie von den Anforderungen ab, die das Endprodukt später erfüllen muss. Dies ist vollständig auf die schweißtechnischen Prozesse der additiven Fertigung übertragbar.

Aufgrund der abweichenden Bedingungen gegenüber dem Verbindungsschweißen wird empfohlen, den additiven Fertigungsprozess über eine vorgezogene Arbeitsprüfung nach DIN EN ISO 15613 [11] oder über eine Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614 [12] mit erweitertem Prüfumfang zu qualifizieren.

In den eigenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass mittels WAAM hergestellte Strukturen in ihren Eigenschaften denen gegossener oder geschmiedeter Bauteile mindestens gleichwertig sind.

## **Literatur**

- [1] Norm DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Ausg. 11.2015. Berlin: Beuth Verlag.
- [2] Normreihe DIN EN ISO 3834 Teil 1 bis 5: Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen. Ausg. 2006. Berlin: Beuth Verlag.
- [3] Norm DIN EN 1993-1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Ermüdung. Ausg. 12.2010. Berlin: Beuth Verlag.
- [4] Richtlinie DVS 1612: Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau. Ausg. 08.2014. Düsseldorf: DVS Media.
- [5] Norm DIN EN ISO 15607: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Allgemeine Regeln. Ausg. 03.2004. Berlin: Beuth Verlag.

- [6] Norm DIN CEN ISO/TR 15608: Schweißen Richtlinie für eine Gruppeneinteilung von metallischen Werkstoffen. Ausg. 08.2013. Berlin: Beuth Verlag.
- [7] Normreihe DIN EN ISO 15609: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißanweisungen. Ausg. 2001–2019. Berlin: Beuth Verlag.
- [8] Norm DIN EN ISO 15610: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund des Einsatzes von geprüften Schweißzusätzen. Ausg. 02.2004. Berlin: Beuth Verlag.
- [9] Norm DIN EN ISO 15611: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund von vorliegender schweißtechnischer Erfahrung. Ausg. 03.2004. Berlin: Beuth Verlag.
- [10] Norm DIN EN ISO 15612: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung durch Einsatz eines Standardschweißverfahrens. Ausg. 10.2018. Berlin: Beuth Verlag.
- [11] Norm DIN EN ISO 15613: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung. Ausg. 09.2004. Berlin: Beuth Verlag.
- [12] Normenreihe DIN EN ISO 15614: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung. Ausg. 2002–2017. Berlin: Beuth Verlag.
- [13] Norm DIN EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken. Ausg. 09.2018. Berlin: Beuth Verlag.
- [14] Norm DIN EN 10210-1: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen - Technische Lieferbedingungen. Ausg. 07.2006. Berlin: Beuth Verlag.
- [15] Norm DIN EN ISO 14341: Schweißzusätze - Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung. Ausg. 04.2011. Berlin: Beuth Verlag.
- [16] Norm DIN EN ISO 5817: Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten Ausg. 06.2014. Berlin: Beuth Verlag.
- [17] Lotz, S.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Roboterassistiertes Schweißen von Rohrknoten“ – VF140054, SLV Halle GmbH, 2017

- [18] Autorenkollektiv GSI-Ressort FuE: „Additive Fertigungsverfahren – Überblick und Erfahrungen in Einrichtungen des DVS (Teil 1), Schweißen und Schneiden, 72 (2020) 7, S. 400–404 und „Additive Fertigungsverfahren – Überblick und Erfahrungen in Einrichtungen des DVS (Teil 2), Schweißen und Schneiden, 72 (2020) 10, S. 657 –663

## **Danksagung**

Das ZIM-Vorhaben ZF4316504DE8 wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Autorenanschriften**

Dr.-Ing. Bernd Kranz, Dipl.-Phys. Bernd Grunewald, Dipl.-Ing. Andreas Ehrich,  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Keitel

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt GmbH  
Köthener Str. 33a  
06118 Halle (Saale)

Telefon: 0345 5246-0  
E-Mail: [qs@slv-halle.de](mailto:qs@slv-halle.de)

Dipl.-Ing. Falk Häschel

Häschel Metalltechnik GmbH & Co. KG  
Rudolf-Breitscheid-Str. 23  
01809 Heidenau

Telefon: 03529 529811  
E-Mail: [kontakt@hmt-haeschel.de](mailto:kontakt@hmt-haeschel.de)